

**ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ БУДОВИ В ВИРОБАХ ЗІ СПЛАВУ ALSI10MG,  
ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА АДИТИВНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ PBF-LB/МНА КІНЦЕВІ  
МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ**

Буштрук С.І.<sup>1</sup>, Миронова Т.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Український державний університет науки і технологій, аспірант Україна

<sup>2</sup> Український державний університет науки і технологій, д.т.н., проф. Україна

**Анотація.** *Виготовлення металевих виробів за технологією PBF-LB/М, що характеризується машинним поступовим сплавленням об'ємів призводить до утворення унікальних (нетипових) структур і дефектів (пустот) з особливим характером розташування, що впливає на кінцевий комплекс механічних властивостей. У нормативній документації питання обов'язкового контролю і допустимого рівня дефектів, які виникають за даною технологією, досі не унормовані, але враховуються опосередковано через коливання рівня механічних властивостей, та мають широкі діапазони допуску. Вивчення впливу параметрів друку на властивості є більш раціональним через застосування матеріалознавчого підходу, що враховує вплив структури і наявності дефектів, бо має перспективи для спрощення обчислень при постановці задач з моделювання. В роботі пропонується для сплаву AlSi10Mg використання характеристик рівня дефектності та морфології структури для визначення показників механічних властивостей.*

**Ключові слова:** *лазерне плавлення металевого порошкового шару, силумін, дефекти будови, норми і методи контролю, міцність, моделювання властивостей.*

Застосування новітніх адитивних технологій виготовлення для задоволення потреб машинобудування у виробництві дрібних серій продукції ставить вимоги по забезпеченню достатніх показників її якості. На теперішній час нормативною документацією регулюються показники механічних властивостей, а вплив структурного фактору, а також наявність дефектів стандартами не нормуються.

Вироби із силуміну AlSi10Mg, виготовлені за технологією PBF-LB/М згідно стандарту [1] мають доволі широкий діапазон коливання показників міцності і пластичності та анізотропний характер останніх. Це пов'язано, як з особливостями структури, так і з розподілом дефектів в об'ємі виробу.

Стандарт [2], який описує дефекти технології PBF-LB/M визначає три їх основні групи за причинами виникнення та наслідками: дефекти будови (структури), дефекти геометрії та дефекти процесу. Саме дефекти будови є основним, майже постійно присутнім фактором, що знижує механічні властивості в усьому об'ємі виробу. Вони включають: газові пори еліпсоїдної форми, пустоти з гострими кутами, що виникають через недостатній проплав, а також мікротріщини. Слід зазначити, що останні два типи дефектів мають значний вплив на механічні властивості, оскільки знижують енергію необхідну для руйнування.

Хоча контроль якості виробів по кількості та розподілу дефектів є додатковими умовами замовлення згідно стандартів, а конкретні кількісні показники визначаються у приватному порядку, окремі організації і відомі дослідницькі центри вважають їх важливими. Наприклад, у документі NASA (США) [3] зазначено, що рівень дефектності в об'ємі не може перевищувати 1%. Визначена межа приблизно відповідає рівню розвитку дефектів, який можна побачити неозброєним оком (1-2%).

Методи контролю дефектів будови, що застосовуються в теперішній час мають багато обмежень, а головне відсутність можливості застосування їх в усьому об'ємі товарних виробів без руйнування. Денситометричний метод потребує низької шорсткості поверхні, що є важливим для забезпечення точності вимірювання в діапазоні розвитку дефектів 0-2%. Металографічний метод є лише напівкількісним через неможливість вираховування реального об'єму дефекту по його площі в перерізі, а також через вірогіднісний фактор потрапляння дефектів в переріз. Метод мікро- комп'ютерної томографії є найбільш точним і досконалим, що визначає і об'єм дефектів і їх розподіл, але успішно застосовується лише на зразках простої форми, за умови невеликої товщини металу.

Для визначення кінцевих властивостей друкованих виробів багатьма дослідниками застосовується моделювання через вплив енергетичних параметрів друку, зокрема питомої об'ємної енергії, яка визначається виразом (1) та її складових.

$$VED = \frac{P}{V \cdot h \cdot t} \quad (1)$$

VED – питома об’ємна енергія, Дж/мм<sup>3</sup>;

P – потужність лазера, Вт;

V – швидкість руху лазера, мм/с;

h – крок сканування (штрихування), мкм;

t – товщина порошкового шару, що сплавляється за один цикл, мкм.

Такий підхід не є універсальним, оскільки не враховує інші фактори, наприклад зміну обладнання, друк іншої геометрії виробу чи фракційний склад порошку. З іншого боку врахування всіх параметрів [4], основні з яких перераховані в табл.1, призводитиме до труднощів в обчисленнях. Наприклад, з 15 визначених параметрів може утворитись не менше 10<sup>12</sup> комбінацій, не враховуючи змін цих показників.

Визначення оптимуму енергетичних параметрів та встановлення допустимих меж дефектності виробу, так само як і впливу структурного стану, є основою для побудови технологічного процесу, що забезпечуватиме стабільність властивостей.

Таблиця 1

Фактори, що впливають на формування властивостей виробів, виготовлених за технологією PBF-LB/M.

Обладнання	Параметри процесу	Геометрія	Матеріал
Характеристики лазера	Потужність лазера	Конфігурація деталі	Технологічні властивості сплаву
Характеристики системи сканування	Швидкість руху лазера	Розміри та товщини окремих елементів	Наявність домішок і вологи у порошку
Схема охолодження газом	Крок штрихування (сканування)	Орієнтація під час друку	Фракційний склад порошку
Площа побудови	Товщина шару	Розташування підтримок	Технологічний газ
Надійність систем	Стратегія сканування	Необхідна якість поверхні	
	Протяжність зупинок		

В роботі [5] виконане моделювання впливу параметрів процесу на ступінь заповнювання об’єму металом, де критерієм успіху було отримання найменшої кількості пустот (дефектів). Слід зазначити, що особливістю

технології PBF-LB/M є повторюваність операцій сплавлення лазером об'єму деталі. Тому дефекти можуть мати як випадковий характер розподілу, пов'язаний, наприклад, з коливанням щільності порошкового шару, так і переважний розподіл, пов'язаний з обраним програмним режимом заповнення (стратегією друку) і наявність меж (стиків) окремих мікрооб'ємів.

Аналогом друкованого сплаву AlSi10Mg за хімічним і фазовим складом є вітчизняний ливарний сплав АЛ4, який згідно літературної класифікації називають «герметичним», за основною задачею свого застосування, без високих вимог до механічних властивостей. Виготовлення за технологією PBF-LB/M забезпечує отримання субмікронної структури, а також більш високих показників міцності та пластичності, хоча і зі значними коливаннями, та суттєво вираженою анізотропією за рівнем пластичності, що пов'язані із впливом внутрішніх дефектів (див. табл.2).

Таблиця 2  
Механічні властивості сплаву АЛ4 (лиття в кокіль) [6] та сплаву AlSi10Mg (PBF-LB/M) [1]

Марка (стан)	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta_5$ , %
АЛ4 (Т6)	240	203	3,5
AlSi10Mg (AsP 0°)	353-482	210-272	2-5
AlSi10Mg (AsP 90°)	372-473	239-292	4-7

Таким чином, враховуючи викладені дані, визначено, що для силуміну виготовленого адитивною технологією PBF-LB/M, так само як і литвом, типовим є лінійний характер залежності зміни межі міцності сплаву від кількості дефектів в діапазоні 0-1%, ширше якого межа міцності знижуються до неприйняттого рівня за стандартом. На рис.1 на графіку наведені скомбіновані дані джерел [7, 8]. Показники пластичності, як виявилось також мають лінійний, хоча й більш стрімкий характер змін.

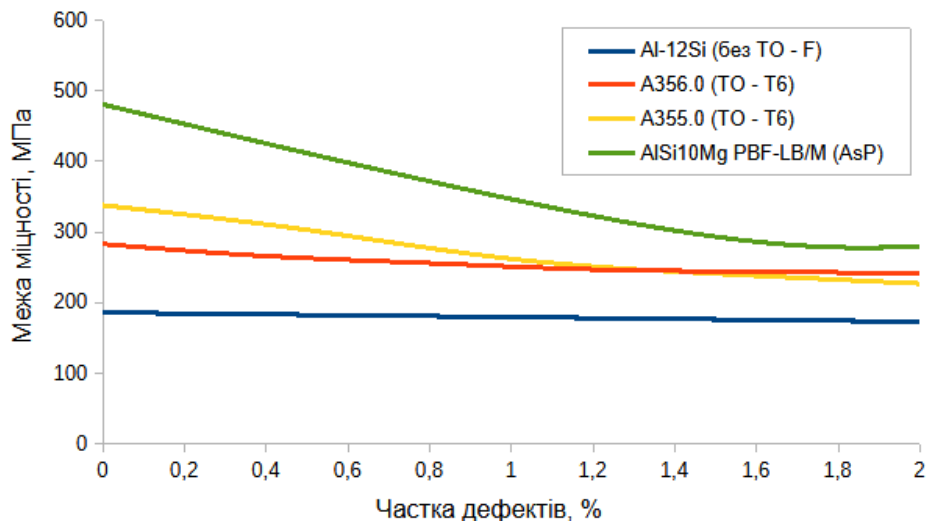


Рисунок 1 - Вплив дефектів будови на міцність силумінів [7, 8]

Дефекти здебільшого орієнтовані в горизонтальній площині побудови виробів [9]. Це впливатиме на процес руйнування при випробуваннях на квазістатичний розтяг, де для вертикальних зразків ( $0^\circ$ ) руйнування відбувається при дещо менших показниках міцності та пластичності, що пов'язано з початком зростанням дефектів з гострими краями та їх об'єднанням з дефектами сусідніх шарів побудови по висоті при менших рівнях деформації ніж для бездефектного виробу. Під час деформації горизонтальних зразків ( $90^\circ$ ) подібного злиття дефектів майже не відбувається, а початкова частка дефектів в площині перерізу менша, що сприяє підвищенню рівня механічних властивостей.

Отримані залежності впливу дефектів на властивості сплаву AlSi10Mg можуть бути описані в простій формі математичними виразами (2) і (3), що можуть бути уточненими проведенням експериментів з режимами технології.

$$\sigma = \sigma_0 \cdot (1 - \rho) \cdot m^S \quad (2)$$

$$\delta = \delta_0 \cdot (1 - \rho) \cdot n^S \quad (3)$$

$\sigma$  і  $\sigma_0$  – межа міцності з впливом та без впливу дефектів, МПа;

$\delta$  і  $\delta_0$  – відносне видовження з впливом та без впливу дефектів, %;

$\rho$  – об'ємна частка дефектів у відносній формі;

$m$  і  $n$  – коефіцієнти, що враховують чутливість характеристики до дефектів;

$s$  – коефіцієнт, що враховує напрямок у якому визначається характеристика.

## Висновки

1. Досліджено морфологію дефектів будови виробів за технологією PBF-LB/M та їх вплив на механічні властивості.

2. Залежність механічних властивостей від характеристик і об'єму дефектів викладена у формі математичних залежностей, які в перспективі можуть застосовуватись в моделюванні процесу.

## ЛІТЕРАТУРА

1. VDI 3405 Blatt 2.1 Additive Fertigungsverfahren - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) - Materialkenndatenblatt Aluminiumlegierung AlSi10Mg. -2020-08 – 7.
2. VDI 3405 Blatt 2.8 Additive Fertigungsverfahren - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) - Fehlerkatalog - Fehlerbilder beim Laser-Strahlschmelzen -2022-12 – 64.
3. MSFC SPEC-3717 2017 SPECIFICATION FOR CONTROL AND QUALIFICATION OF LASER POWDER BED FUSION METALLURGICAL PROCESSES.
4. ASM Handbook®, Volume 24 - Additive Manufacturing Processes – Materials Park, Ohio: ASM International, 2020.
5. Полупан, А. С. Теоретичне визначення режимів селективного лазерного плавлення для виготовлення деталей з мінімальним рівнем пористості //Авіаційно-космічна техніка і технологія. –2022. – №2 – С. 38-46. DOI: 10.32620/aktt.2022.2.05
6. А.В. Давидюк, Н.Є. Калініна, С.О. Полішко. Вплив модифікування дисперсними наноконпозиціями на структуру та властивості ливарних силумінів. Вісник Харківського національного автомобільнодорожнього університету. 2023. № 103. С. 117 – 121. DOI: 10.30977/bul.2219-5548.2023.103.1.117
7. Aluminum alloy castings properties, processes and applications/John Gilbert Kaufman, Elwin L. Rooy - ASM International, Jan 1, 2004
8. Tomotake Hirata, Takahiro Kimura, Takayuki Nakamoto, Effect of Internal Pores on Fatigue Properties in Selective Laser Melted AlSi10Mg Alloy, MATERIALS TRANSACTIONS, 2022, Volume 63, Issue 7, Pages 1013-1020, Released on J-STAGE June 25, 2022, Online ISSN 1347-5320, Print ISSN 1345-9678, DOI: 10.2320/matertrans.MT-L2022005,
9. Wu, Z., Wu, S., Gao, X. et al. The role of internal defects on anisotropic tensile failure of L-PBF AlSi10Mg alloys. Sci Rep 13, 146 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-39948-z

## INFLUENCE OF STRUCTURAL DEFECTS IN PRODUCTS MADE FROM ALSi10MG ALLOY BY PBF-LB/M ADDITIVE TECHNOLOGY ON THE FINAL MECHANICAL PROPERTIES

Serhii Bushtruk, Tetiana Myronova

**Abstract.** *The production of metal parts using PBF-LB/M technology, characterized by machine incremental fusion of volumes, leads to the formation of unique (atypical) structures and defects (voids) with a specific character of location, which impacts the final set of mechanical properties. Currently, standards do not regulate the control and permissible level of defects arising from this technology, but they are indirectly assessed through controlling mechanical properties, which have wide tolerance ranges. Investigating the influence of technology parameters on properties is more effective with a materials science-based approach that considers both the impact of structure and the presence of defects, as it simplifies calculations for modeling tasks. This paper suggests utilizing defect level characteristics and structure morphology to determine the mechanical properties of the AlSi10Mg alloy.*

**Keywords:** *laser-based powder bed fusion, silumin, defects in materials, norms and methods of control, strength, modeling of properties.*

### REFERENCE

1. VDI 3405 Blatt 2.1 Additive Fertigungsverfahren - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) - Materialkenndatenblatt Aluminiumlegierung AlSi10Mg. -2020-08 – 7.
2. VDI 3405 Blatt 2.8 Additive Fertigungsverfahren - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) - Fehlerkatalog - Fehlerbilder beim Laser-Strahlschmelzen -2022-12 – 64.
3. MSFC SPEC-3717 2017 SPECIFICATION FOR CONTROL AND QUALIFICATION OF LASER POWDER BED FUSION METALLURGICAL PROCESSES.
4. ASM Handbook®, Volume 24 - Additive Manufacturing Processes – Materials Park, Ohio: ASM International, 2020.
5. Polupan, A. S. Teoretychne vyznachennia rezhymiv selektyvnoho lazernoho plavlennia dlia vyhotovlennia detalei z minimalnym rivnem porystosti //Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia. –2022. – №2 – C. 38-46. [in Ukrainian]. DOI: 10.32620/akt.2022.2.05
6. A.V. Davydiuk, N.Ie. Kalinina, S.O. Polishko. Vplyv modyfikuvannia dyspersnyh nanokompozytsiiamy na strukturu ta vlastyvoli lyvarnykh syluminiv // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilnodorozhnoho universytetu. 2023. № 103. S. 117 – 121. [in Ukrainian] DOI: 10.30977/bul.2219-5548.2023.103.1.117
7. Aluminum alloy castings properties, processes and applications/John Gilbert Kaufman, Elwin L. Rooy - ASM International, Jan 1, 2004
8. Tomotake Hirata, Takahiro Kimura, Takayuki Nakamoto, Effect of Internal Pores on Fatigue Properties in Selective Laser Melted AlSi10Mg Alloy, MATERIALS TRANSACTIONS, 2022, Volume 63, Issue 7, Pages 1013-1020, Released on J-STAGE June 25, 2022, Online ISSN 1347-5320, Print ISSN 1345-9678, DOI: 10.2320/matertrans.MT-L2022005,
9. Wu, Z., Wu, S., Gao, X. et al. The role of internal defects on anisotropic tensile failure of L-PBF AlSi10Mg alloys. Sci Rep 13, 146 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-39948-z